

Радиационная стойкость диодов Шоттки на основе *n*-GaN

© А.А. Лебедев^{†‡¶}, С.В. Белов[†], М.Г. Мынбаева[†], А.М. Стрельчук[†], Е.В. Богданова[†], Ю.Н. Макаров^{*}, А.С. Усиков^{‡#}, С.Ю. Курин^{*}, И.С. Бараш^{*}, А.Д. Роенков^{*}, В.В. Козловский[•]

[†] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} ГК „Нитридные кристаллы“, 194156 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Nitride Crystals Inc., 11729 N.Y., USA

[#] Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Россия

[•] Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет, 195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 10 марта 2015 г. Принята к печати 16 марта 2015 г.)

Диоды Шоттки диаметром ~ 10 мкм изготовлены на основе эпитаксиальных пленок *n*-GaN, выращенных хлор-гидридной эпитаксией (HVPE) на сапфировых подложках. Исследованы изменения параметров диодов при облучении протонами с энергией 15 МэВ. Определена скорость удаления носителей, которая составила $130\text{--}145\text{ см}^{-1}$. Линейный характер зависимости $N = f(D)$ (N — концентрация носителей, D — доза облучения) показывает, что компенсация связана с переходом электронов с мелких доноров на глубокие уровни, созданные первичными радиационными дефектами.

1. Введение

Поиски широкозонных полупроводников, которые могли бы заменить кремний для создания различных типовых силовых приборов, проводились достаточно давно [1]. Достигнутый в последние годы успех в технологии GaN и твердых растворов на его основе позволяет по-новому взглянуть на эту проблему. Хотя GaN уступает SiC в теплопроводности (см. таблицу) и кристаллическом качестве эпитаксиальных слоев, рост GaN происходит при меньших температурах, с использованием более дешевых материалов и на различных подложках. Таким образом, диоды Шоттки на основе GaN могут конкурировать с аналогичными приборами на основе SiC в диапазоне напряжений до 1000 В [3–5].

Целью настоящей работы было получение диодов Шоттки на основе GaN и исследование их радиационной стойкости.

2. Результаты

Исследуемые эпитаксиальные слои *n*-GaN толщиной ~ 10 мкм были выращены хлор-гидридной газофазной эпитаксией (HVPE) при температуре 1020–1050°C на сапфировых подложках (Al_2O_3) [6]. Концентрация нескомпенсированных доноров $N_D - N_A$ в исходных эпитаксиальных слоях определялась методом вольт-фарадных характеристик с помощью ртутного зонда. Как видно из рис. 1, вблизи поверхности находился слой с концентрацией $N_D - N_A \approx 4 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ и толщиной 0.8–0.9 мкм. На полученных слоях были сформированы диоды Шоттки с полевой обкладкой (field plate Schottky

diodes [7]) с использованием стандартных процедур фотолитографии и напыления металлических пленок, формирующих барьерный и омический контакты. В качестве полевой обкладки барьерного контакта, сформированного на основе пленок золота (Au), использовалось диэлектрическое покрытие из диоксида кремния (SiO_2) толщиной 0.4 мкм. Барьерные контакты к GaN формировались в окнах диаметром $d = 10\text{--}50$ мкм, вскрытых в пленке SiO_2 . В результате повторного напыления площадь контактов увеличивалась за счет формирования перекрытия диэлектрика на 10–15 мкм (рис. 2). Омический контакт формировался с лицевой стороны эпитаксиальных структур GaN/ Al_2O_3 в виде широкой (5 мм) полосы по краю пластины. Для формирования омического контакта напылялись слои никеля (Ni) толщиной 0.3 мкм поверх пленок титана (Ti) толщиной 30 нм. Далее проводился отжиг сформированных контактов при температуре 850°C в вакууме в течение 90 с.

Полученные диоды Шоттки имели выпрямляющую вольт-амперную характеристику. Наряду с некоторым разбросом вольт-амперных характеристик диодов одной площади наблюдалась явно выраженная зависимость

Электрофизические параметры Si, 4H-SiC и GaN [2]

Параметры	Si	4H-SiC	GaN
Ширина запрещенной зоны, эВ	1.1	3.2	3.4
Напряженность поля пробоя, 10^6 В/см	0.3	3	3.5
Подвижность электронов, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1450	900	2000
Скорость насыщения электронов, 10^6 см/с	0	22	25
Теплопроводность, Вт/см · К	1.5	5	1.3
Средняя плотность дислокаций в эпитаксиальном слое, см^{-2}	10^0	10^3	10^8

[¶] E-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

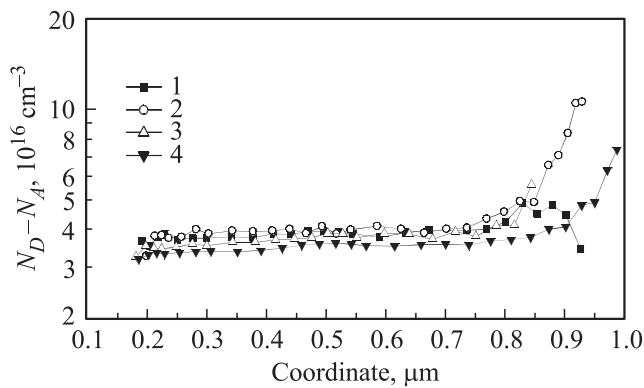


Рис. 1. Профиль распределения нескомпенсированной донорной примеси в различных точках образцов 1–4.

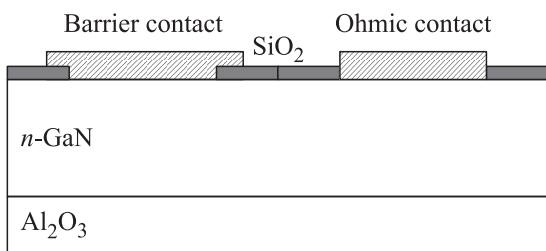


Рис. 2. Схематическое изображение исследованных диодов Шоттки на GaN.

характеристик от площади диода: при прямом смещении дифференциальное сопротивление диода меняется от 150 Ом при $d = 10$ мкм (поверхностное сопротивление $R_s = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см²) до 60–70 Ом при $d = 40$ –50 мкм ($R_s \approx 1 \cdot 10^{-3}$ Ом·см²) (рис. 3). При обратном смещении структуры напряжение пробоя изменялось от 60–80 В (диаметр 50 мкм) до 100–120 В (диаметр 10 мкм) (рис. 4). Если исходить из того, что напряжение пробоя (U_{br}) исследовавшихся диодов Шоттки определялось слабо легированным слоем у поверхности слоя, то теоретическое значение U_{br} должно было составить 300–350 В, т.е. полученное в настоящей работе U_{br} составило 25–30% от теоретически возможного. По-видимому, это было связано с простой схемой защиты периферии диода Шоттки и недостаточно высоким кристаллическим качеством эпитаксиального слоя.

Облучение протонами выполнялось на циклотроне МГЦ-20. Использовались протоны с энергией 15 МэВ в диапазоне доз облучения $D = 1.0 \cdot 10^{13}$ – $4.0 \cdot 10^{14}$ см⁻². На рис. 5 представлена зависимость $1/R$ от дозы облучения (где R — сопротивление диода Шоттки в прямом направлении). На основе представленных на рис. 5 зависимостей можно оценить скорость удаления носителей (V_d), используя известную формулу $V_d = (N_0 - N)/D$, где N_0 и N — концентрации носителей до и после облучения соответственно.

Пренебрегая зависимостью подвижности носителей от облучения и полагая $N_D - N_A \approx N_0$, можно запи-

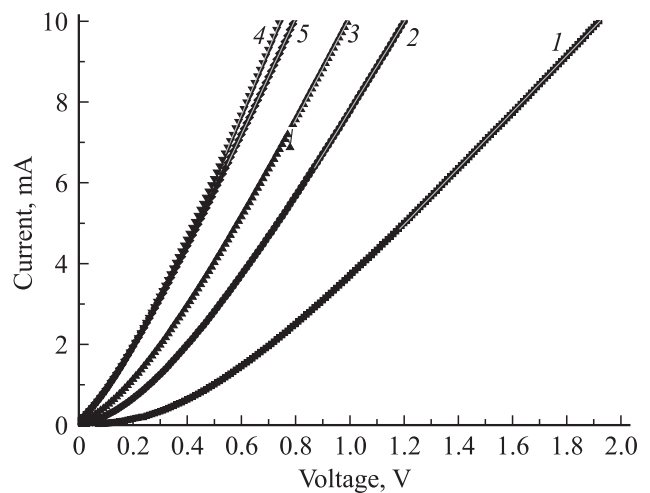


Рис. 3. Прямые вольт-амперные характеристики диодов Шоттки различных диаметров; мкм: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 50 мкм.

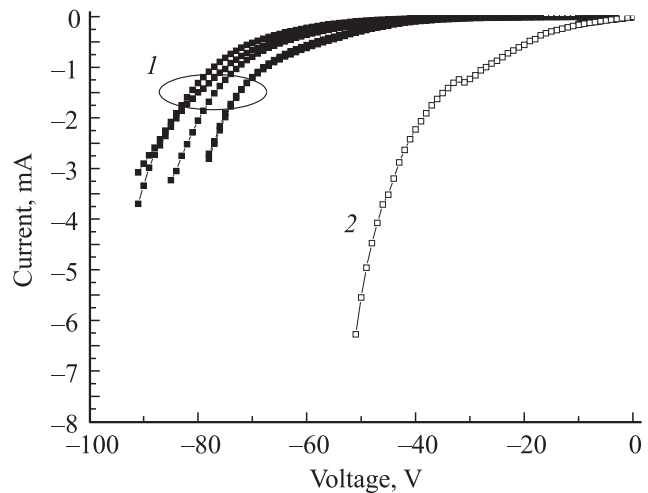


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики диодов Шоттки диаметром 10 (1) и 50 мкм (2) при обратном смещении.

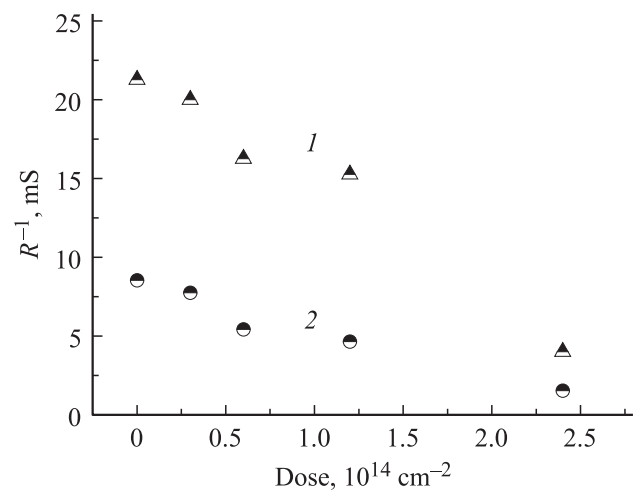


Рис. 5. Зависимость проводимости в прямом направлении диодов Шоттки на GaN диаметром 10 (1) и 50 мкм (2) от дозы облучения протонами с энергией 15 МэВ.

сать: $1/R \propto eN\mu \propto N$ (где e — заряд электрона, μ — подвижность). Тогда величину V_d можно оценить как $V_d \leq N_0/D_{\max}$, где D_{\max} — доза облучения, при которой наблюдается полная компенсация образца. В нашем случае можно оценить V_d как $130\text{--}145\text{ см}^{-1}$. Следует отметить, что полученная оценка скорее всего больше реальной величины из-за того, что не учитывалось уменьшение подвижности носителей под действием облучения. Полученная величина оказалась близка к значению $V_d = 110\text{--}130\text{ см}^{-1}$ для SiC при облучении протонами с энергией 8 МэВ [8].

Как видно из рис. 5, зависимость $1/R = f(D)$, или $N = f(D)$, носит линейный характер. Это указывает на то, что компенсация материала происходит за счет образования глубоких акцепторных центров, на которые переходят электроны с мелких донорных уровней [9]. В то же время ранее отмечалось, что компенсация эпитаксиальных слоев GaN, выращенных методом MOCVD (методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений), обусловлена образованием комплексов радиационный дефект–мелкий донор [10,11]. Возможно, это связано с различным составом фоновой примеси в слоях n -GaN, выращенных по различным технологиям.

3. Заключение

В ходе выполнения работы на основе эпитаксиальных слоев n -GaN, выращенных методом HVPE, были изготовлены прототипы диодов Шоттки. Скорость удаления носителей при облучении протонами оказалось близка к скорости удаления в эпитаксиальных слоях SiC. Дальнейшая оптимизация приборов может быть достигнута за счет использования для роста подложек SiC и увеличения степени структурного совершенства слоев n -GaN.

Список литературы

- [1] A.A. Lebedev. *J. Wide Bandgap Mater.*, **8**, 129 (2000).
- [2] *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, ed. by M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev and M.S. Shur (John Wiley & Sons Inc., 2001).
- [3] T. Boles, C. Varmazis, D. Carlson, L. Xia, D. Jin, T. Palacios, G.W. Turner, R.J. Molnar. *Proc CS MANTECH Conf.* (New Orleans, Louisiana, 2013) p. 297.
- [4] P. Roussel. *Semiconductor Today*, **2**, 52 (2007).
- [5] I.C. Kizilyalli, A. Edwards, D. Bour, H. Shah, H. Nie, D. Disney. *How2Power Today* (March 2013). www.how2power.com.
- [6] А.В. Соломонов, С.А. Тарасов, Е.А. Менькович, И.А. Ламкин, С.Ю. Курин, А.А. Антипов, И.С. Бараш, А.Д. Роенков, Х. Хелава, Ю.Н. Макаров. *ФТП*, **48**, 259 (2014).
- [7] Lei Yong, Shi Hongbiao, Lu Hai, Chen Dunjun, Zhang Rong, Zheng Youdou. *J. Semiconductors*, **34**, 054007 (2012).
- [8] A.A. Lebedev, D.V. Davydov, A.I. Veinger, N.S. Savkina, A.M. Strel'chuk, V.V. Kozlovski. *J. Appl. Phys.*, **88**, 6265 (2000).
- [9] В.В. Козловский, А.Е. Васильев, В.В. Емцев, А.А. Лебедев. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 9, 101 (2014).
- [10] А.И. Титов, П.А. Карасев, С.О. Кучеев. *ФТП*, **38**, 1215 (2004).
- [11] A.I. Titov, S.O. Kucheyev. *J. Appl. Phys.*, **92**, 5740 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

Radiation hardness of Schottky diodes on n -GaN

A.A. Lebedev⁺, S.V. Belov⁺, M.G. Mynbaeva⁺,
A.M. Strel'chuk⁺, E.V. Bogdanova⁺, Yu.N. Makarov^{*},
A.S. Usikov^{‡, #}, S.Yu. Kurin^{*}, I.S. Barash^{*},
A.D. Roenkov^{*}, V.V. Kozlovski[•]

⁺ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

^{*} „Nitride Crystal, Inc“,

194156 St. Petersburg, Russia

[‡] Nitride Crystals Inc.,

11729 NY, USA

[#] University ITMO,

197101 St. Petersburg, Russia

[•] St. Petersburg State Polytechnic University,

195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Schottky barrier diodes with diameter of $\sim 10\ \mu\text{m}$ were fabricated on n -GaN epitaxial films grown by HVPE on sapphire. Changes of the diodes parameters under 15 MeV proton irradiation were investigated. The proton-induced carriers removal rate found to be of $130\text{--}145\text{ см}^{-1}$. Linear character of the dependence $N = f(D)$ (N — carrier concentration, D — irradiation dose) shows that material compensation is due to electron transition from shallow donors to deep acceptor radiation defects.